

Paavo Koukku

KIVIAINEKSEN KAPILLAARISUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Juha Latvala
Tammikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Paavo Koukku: Kiviaineksen kapillaarisuuteen vaikuttavat tekijät (Factors affecting capillarity of stone aggregates)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikka

Tammikuu 2020

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuusselvitys kapillaari-ilmiöstä kiviaineksessa ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Veden kapillaarinen nousu on haitallinen ilmiö maa- ja pohjarakenteissa ja se on vahvasti sidoksissa materiaalin ominaisuuksiin. Työn tavoitteena oli selvittää kapillaarisuuden teoriaa sekä olennaisimmat kiviaineksen ominaisuudet, jotka vaikuttavat sen kapillaarisuuteen.

Työhön kerättiin tietoa suomalaisista ja ulkomaalaisista geotekniikan ja maaperägeologian oppaista sekä kapillaarisuuteen liittyvistä tieteellisistä artikkeleista. Näiden tietojen pohjalta tehtiin raportti, jossa käsitellään ensin veden esiintymistä maaperässä ja veden potentiaalimallia. Sen jälkeen käsitellään kapillaarisuuden teoriaa ja mittausmenetelmiä. Työssä listataan kapillaarisuuteen vaikuttavia tekijöitä yleisesti sekä erikseen materiaalienkohtaisesti. Materiaaleista tässä työssä käsitellään luonnon lajittamia materiaaleja ja murskattua kiviainesta. Työstä rajattiin pois rajallisen laajuuden vuoksi uusiomateriaalit ja muut maa- ja pohjarakentamisessa käytettävät materiaalit, kuten kevytsora, vaahtolasimurske ja bitumilla sidotut kiviainekset.

Kiviaineksen kapillaarisuuteen vaikuttaa eniten hienoainespitoisuus eli alle 0,074 mm kokoisien aineksen osuus raekokojakaumasta. Lisäksi vaikutusta on materiaalin tiiviysasteella, mineraalikoostumuksella ja rakeiden muodolla. Kirjallisuudesta löytyneissä kapillaarisuuteen liittyvissä tutkimuksissa korostuu hienoainespitoisuuden ja kapillaarisen nousukorkeuden välinen yhteys. Kapillaarisuuteen vaikuttavat myös rakeiden muoto, tiiviysaste, kiviaineksen mineraalit, lämpötila, sekä kuivumisen ja kastumisen ero. Kirjallisuusselvityksessä ilmeni, että murskattujen kiviainesten kapillaarisuutta ei ole tutkittu yhtä laajasti, kuin luonnon lajittamilla materiaaleilla.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Työn tausta	1
1.2 Työn rakenne	1
2. VESI MAASSA	3
2.1 Maan vesivyöhykkeet	3
2.2 Veden sitoutuminen	4
2.3 Veden potentiaalimalli	6
3. KAPILLAARISUUS	9
3.1 Matriisipotentiaali ja siihen vaikuttavat tekijät	9
3.2 Merkittävimmät kapillaarisuuteen vaikuttavat materiaalin ominaisuudet ...	12
3.2.1 Huokoisuus	12
3.2.2 Raekokojakauma	13
3.2.3 Rakeiden muoto ja tiiviysaste	13
3.2.4 Mineraalit	14
3.2.5 Kostumisen ja kuivumisen ero	14
3.2.6 Lämpötila	16
3.3 Kapillaarisuuden mittausmenetelmät	16
4. MATERIAALIKOHTAISIA OMINAISUUKSIA	18
4.1 Luonnon lajittamat materiaalit	18
4.2 Murskatut kiviainekset	21
5. YHTEENVETO	25
LÄHTEET	27

1. JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Vesi ja sen liikkuminen maassa on maa- ja pohjarakentamisessa yksi tärkeimmistä rakennuspaikan olosuhdetekijöistä. Vesipitoisuuden muutokset muuttavat maan lujuusominaisuuksia, mahdollistavat routimisen ja aiheuttavat pohjarakenteisiin kosteuskuormitusta (Airaksinen 1978). Veden liikkeet on siis tunnettava erilaisissa maalajeissa. Tässä työssä tutkitaan kapillaarisuutta, joka on yksi veden liikkumismuodoista maassa. Kapillaarisuus on ilmiönä yleensä haitallinen, sillä sen vuoksi maassa oleva vesi pääsee nousemaan ylöspäin. Kapillaarisuus on helposti omaksuttavissa käytännön tasolla, sillä veden nouseminen ylöspäin esimerkiksi ohuissa putkissa on yleisesti tunnettu ilmiö. Kapillaarisuus on teoriana kuitenkin monimutkainen käsite. Partikkelitasolla maahiukkasten ja veden välillä on useita vuorovaikutuksia, jotka vaikuttavat veden sitoutumiseen ja liikkumiseen (Airaksinen 1978, Kujala 1994).

Rakennusten alapohjarakenteet ovat jatkuvasti kosketuksissa täyttömaahan ja sen kautta maaperään. Veden kapillaarinen virtaus on yksi osatekijä alapohjien ja perustuksien kosteusongelmissa (Leivo & Rantala 2000). Veden kapillaarinen nousu pitää huomioida, kun valitaan täyttömateriaaleja ja kerrospaksuuksia rakennusten pohjarakenteisiin.

Kujalan (1994) mukaan routimisen yksi edellytys on veden saatavilla olo routimisvyöhykkeessä. Routiminen aiheuttaa maassa muodonmuutoksia ja voi aiheuttaa vaurioita maanvaraisiin rakenteisiin. Yleensä voimakkaasti kapillaarinen materiaali on myös routivaa. Tie- ja ratarakenteeseen alapuolelta imeytyvän kosteuden määrään vaikuttaa muiden tekijöiden ohella pohjamaan ja rakennekerrosten materiaalien kapillaarisuus. Tierakenteeseen nouseva vesi pienentää materiaalin lujuutta, joka kuormituksessa johtaa vaurioihin, sekä mahdollistaa routimisen. Routiminen ja yleensäkin veden imeytymisen rakenteisiin aiheuttaa liikennehaittoja ja lisää ylläpitokustannuksia rata- ja tierakenteissa. (Kujala 1994)

1.2 Työn rakenne

Tavoitteena tässä tutkimuksessa on selvittää kapillaarisuuden taustalla vaikuttavat tekijät pääpiirteittäin. Lisäksi tutkitaan, millaisia eroja eri maalajien välillä on, ja mistä erot johtuvat. Aihetta lähestytään selvittämällä ensin veden esiintyminen maassa ja miten sitä voidaan jaotella sitoutumisen perusteella. Sen jälkeen selvitetään yleisiä kapillaarisuu-

teen vaikuttavia tekijöitä ja kapillaarisuuden mittaamenetelmiä. Lopuksi tutkitaan materiaaliakohtaisia eroja kapillaarisuudessa. Kapillaarisuuteen liittyen on tehty lukuisia tutkimuksia ja aihetta käsitellään maaperägeologian ja geotekniikan teoksissa (Airaksinen 1978, Rethati 1983, Jääskeläinen 2009). Erilaisille maalajeille ja murskeille on tehty laboratoriokokeita kapillaarisen nousukorkeuden määrittämiseksi. Näiden tietojen pohjalta on saatu karkeat arviot erilaisten materiaalien kapillaarisuudelle.

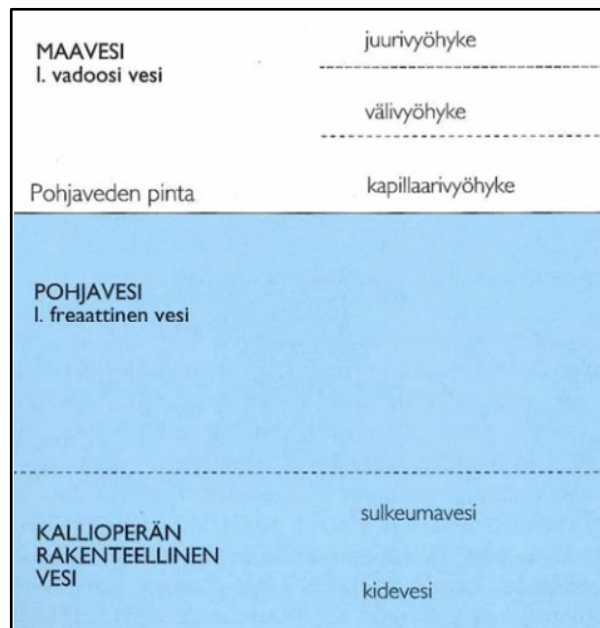
Kapillaarisuus on aiheena laaja, joten sitä ei ole tarkoituksenmukaista tutkia kokonaan kandidaatintyössä. Luonnonmateriaaleja kuten savia, hiekkoja, soria ja moreeneja on tutkittu kapillaarisuuden osalta kattavasti kirjallisuudessa. Kalliomurskeiden käyttö on lisääntynyt rakentamisessa viime vuosikymmeninä, mutta niiden kapillaarisuudesta ei ole tutkimustietoa yhtä paljon. Lisäksi uusiomateriaalien, kuten betoni- ja asfalttimurskeiden käyttö rakennusmateriaaleina lisääntyy, joten myös ne ovat kiehtovia tutkittavaksi. Tämä työ rajataan materiaalien osalta kalliomurskeisiin ja luonnonmateriaaleihin.

Työ tehdään kirjallisuusselvityksenä. Lähteinä käytetään alan perusteoksia ja oppaita, tieteellisiä julkaisuja ja opinnäytetöitä. Lähdeteoksia on saatavilla 1900-luvun puolesta välistä lähtien ja perusteet eivät ole muuttuneet vuosien aikana. Uudemmissa lähteissä viitataan aina vanhempiin perusteoksiin tuoden esille uusia mittaamenetelmiä tai näkökulmia.

2. VESI MAASSA

2.1 Maan vesivyöhykkeet

Maaperä voidaan jakaa pystysuunnassa eri vyöhykkeisiin, joissa veden esiintyminen vaihtelee. Hydrologiassa jaottelu on kuvan 1 mukaisesti ylhäältä alaspäin: juurivyöhyke, välivyöhyke, kapillaarivyöhyke ja pohjavesivyöhyke. Alimpana on kallio tai muu vettä läpäisemätön rakenne. (Korkka-Niemi & Salonen 1996)



Kuva 1. Maaperän vesivyöhykkeet (Korkka-Niemi & Salonen 1996).

Kolme ylintä vyöhykettä muodostavat maavesivyöhykkeen, jossa maa on osittain vedellä kyllästynyt. Kapillaarisuus vaikuttaa pääasiassa osittain kyllästyneessä vyöhykkeessä kapillaarisen nousun korkeudella pohjaveden pinnan yläpuolella. Kapillaarivyöhykkeeseen nousee vettä pohjaveden pinnasta, ja sinne vajoaa vettä maan pinnalta. Lisäksi myös juuri- ja välivyöhykkeissä on kapillaarista nousua. (Korkka-Niemi & Salonen 1996)

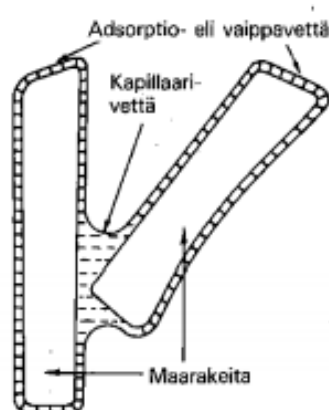
Veden kiertokulussa osa maahan satavasta vedestä imeytyy maaperään ja jää sinne pohjavedeksi. Vettä pidättävillä maalajeilla imeytyminen on vähäisempää kuin vettä hyvin läpäisevillä. Myös kasvillisuuden määrä, paikalliset sadeolosuhteet ja maanpinnan muodot vaikuttavat maahan imeytyvän veden määrään. Jos maa on voimakkaasti kapillaarista, maahan satanut vesi nousee takaisin kohti maanpintaa. (Korkka-Niemi & Salonen 1996)

Pohjavesi liittyy veden kiertokulkuun kapillaarisen nousun, vajovirtauksen ja pohjavesivalunnan kautta. Vajovesi on sadevettä, joka imeytyy maahan ja vajoaa kohti pohjavedenpintaa. Osa maahan imeytyneestä vedestä nousee kapillaarisesti takaisin kohti maanpintaa. Pohjavesi virtaa maassa korkeammasta potentiaalista kohti matalampaa ja purkautuu vesistöihin. Pohjaveden määrä vaihtelee vuodenaikojen mukaan siten, että vedenpinta on matalin ennen lumen sulamista keväällä ja kesän lopussa. Ylimmillään pohjavesi on kevään lopussa lumen sulamisen jälkeen ja syyssateiden jälkeen. (Korkka-Niemi & Salonen 1996)

Pohjaveden pinnan alapuolella maa on täysin kyllästynyttä ja vesi virtaa huokosissa. Alue on osittain kyllästynyttä, ja siellä on virtauksia sekä pysty- että vaakasuunnassa. Pohjavesi nousee kapillaarisesti ylöspäin, sadevesi vajoaa alaspäin painovoiman vaikutuksesta ja osa sadevedestä nousee maanpintaan kapillaarisesti. Samaan aikaan vesi virtaa myös vaakasuunnassa potentiaalierojen vaikutuksesta. Pohjaveden virtausnopeus on pieni, suuruusluokaltaan 1,5 m/a – 1,5 m/d (Airaksinen 1978).

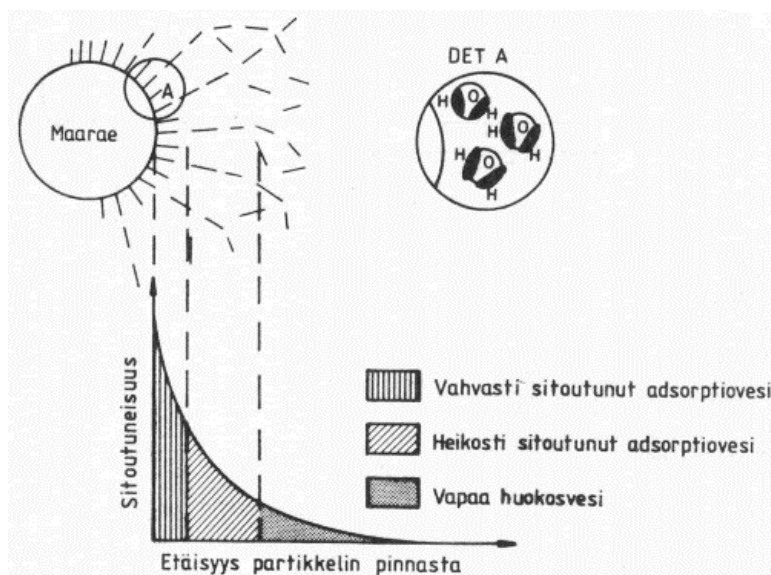
2.2 Veden sitoutuminen

Maassa olevaan veteen vaikuttavista voimista tärkeimmät ovat painovoima, pintajännitys ja sähköiset voimat (Isohaka 2014). Vesi voidaan jakaa sitoutumisen perusteella kolmeen luokkaan, jotka ovat adsorptio-, kapillaari- ja vajovesi (Airaksinen 1978). Karkeamman jaottelun mukaan vesi jaetaan kahteen osaan, jotka ovat sitoutunut ja vapaa vesi (Kujala 1994). Kuvassa 2 on Airaksisen (1978) esitys adsorptio- ja kapillaariveden sijainnista maarakeiden ympärillä. Adsorptiovesi eli vaippavesi on kalvona maarakeiden ympärillä. Kapillaarivesi on kiinnittynyt rakeiden väleihin ja kulmiin. Vajovesi täyttäisi loput huokostilasta. (Airaksinen 1978)



Kuva 2. Adsorptio- ja kapillaarivesi maarakeiden ympärillä (Airaksinen 1978).

Kujalan (1994) mukaan adsorptiossa eli hygroskooppisessa sitoutumisessa kaasumainen vesi sitoutuu kiinteän aineen pinnalle sähköisten voimien avulla. Maarakeen pinnalla on negatiivinen varaus. Vesimolekyylit ovat poolisia, eli niiden toinen pää on varautunut positiivisesti ja toinen negatiivisesti. Maarakeen pinnan ja vesimolekyylien positiivisesti varautuneiden vetyatomien välille syntyy sähköinen vetovoima. Vesimolekyylit muodostavat rakeen pinnalle kalvon, jonka paksuus on noin 660 nm. Adsorptioveden sitoutumisen voimakkuus muuttuu vesimolekyylin etäisyyden mukaan rakeen pinnasta kuvan 3 mukaisesti. Rakeen pinnassa on 1 – 10 molekyylin paksuinen kerros erittäin tiukasti sitoutunutta vettä, jota kutsutaan hygroskooppiseksi vedeksi. Liikuttaessa kauemmas rakeen pinnasta vetovoima heikkenee eli vesi irtoaa helpommin. (Kujala 1994) Toisinaan adsorptio- ja hygroskooppisella vedellä tarkoitetaan samaa, koska niiden taustalla on sama ilmiö.

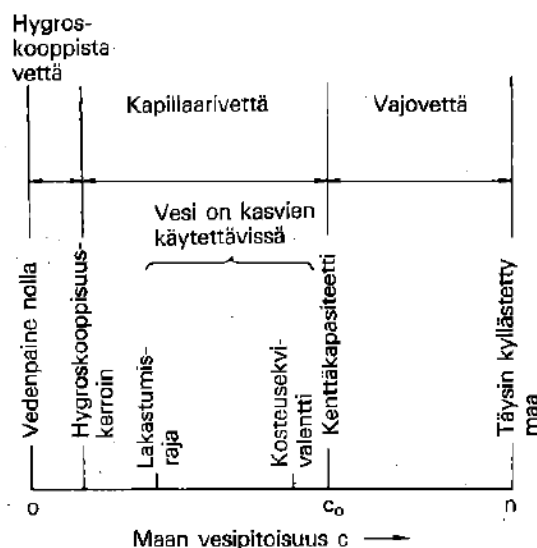


Kuva 3. Adsorptioveden sitoutuminen (Kujala 1994).

Kapillaarivesi on kapillaarivoimien vaikutuksesta pohjaveden pinnan yläpuolelle nousutta vettä, joka on sitoutunut maarakeiden väleihin ja kulmiin. Kapillaarivesi täyttää ensin pienimmät huokoset ja vesipitoisuuden noustessa myös suuremmat huokoset täyttyvät. Kapillaarisesti sitoutuneen veden pinta on kaareutunut kuten kuvassa 2 on esitetty. Kaareutunutta pintaa huokosessa kutsutaan meniskukseksi ja se johtuu pintajännityksistä. (Airaksinen 1978, Kujala 1994)

Vajovesi on maanpinnalta valuvaa sadevettä, joka liikkuu painovoiman vaikutuksesta kohti pohjavedenpintaa. Vajovettä kutsutaan myös vapaaksi vedeksi. Toisaalta vapaa vesi voi tarkoittaa myös kuvan 3 tavoin laajemmin kaikkea sitä vettä, joka on adsorption vaikutuksen ulkopuolella. (Kujala 1994)

Kuvassa 4 on ryhmitelty hygroskooppinen vesi, kapillaarivesi ja vajovesi maan vesipitoisuuden mukaisiin väleihin. Kuvassa on havainnollistettu sitä, että vaikka maa näyttää ulospäin kuivalta eli kasvit eivät pysty hyödyntämään vettä, maassa on vielä sitoutuneena vettä. Kasvien lakastumisraja on kapillaariveden puolella, mikä tarkoittaa, että osa kapillaarivedestäkin on niin lujasti sitoutunut, että kasvit eivät kykene irrottamaan sitä.



Kuva 4. Veden esiintymismuodot maassa (Airaksinen 1978).

Kuvan 4 mukainen jaottelu selventää käsitteiden merkityksiä. Jaottelusta saadaan kuitenkin hyötyä vain lähinnä maan viljelyskäytön hyväksi. Vesipitoisuuden väli, jolla vesi on kasvien käytettävissä, riippuu maan ominaisuuksista, ympäristöstä ja kasveista (Airaksinen 1978). Tämä jaottelu ei kerro vielä veden energiatasosta, sillä raja hygroskooppisen ja kapillaariveden välillä on häilyvä.

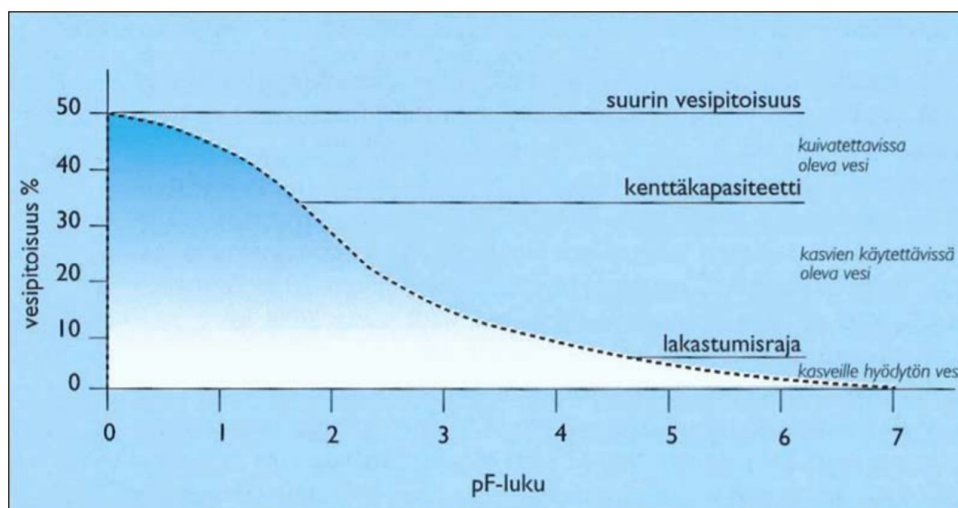
Edellä mainittujen sitoutumistapojen lisäksi maassa on myös osmoottisesti sitoutunutta vettä. Veteen liukenee maarakeista ja virtauksien mukana ympäristöstä erilaisia aineita, jotka aiheuttavat paine-eroja veteen. Osmoottisessa sitoutumisessa maa vetää puoleensa vettä tasoittamaan pitoisuuseroja. (Airaksinen 1978, Kujala 1994) Eri tavoin sitoutuneita vesimassoja ei voi erottaa käytännössä. Koko vesimassaan vaikuttavat adsorptio-, kapillaarinen ja osmoottinen sitoutuminen, ja painovoima vaikuttaa kaikkiin.

2.3 Veden potentiaalimalli

Veden sitoutumisen tarkemmaksi analysoinniksi korvataan veden sitoutumisen luokat potentiaalienergialla. Potentiaalienergia tarkoittaa käytännössä työn määrää, joka tarvitaan sitoutumisen poistamiseen. Työtä vastaava potentiaalitaso voidaan ilmoittaa esimerkiksi jollakin energian mittayksiköllä tai painetasona. Painetaso vastaa sitä alipainetta, jolla maahan sitoutunut vesi irtoaa maasta. Kun paine ilmoitetaan vesipatsaan

korkeutena senttimetreinä ja arvot muutetaan logaritmiseksi, saadaan materiaalin vedenpidätyskykyä kuvaava pF-luku. Kuvan 5 mukaisessa vedenpidätyskäyrässä esitetään maan vesipitoisuus pF-luvun funktiona. Voimakkuus, jolla vesi on sitoutunut maahan, vaihtelee vesipitoisuuden mukaan ja pF-käyrän muoto vaihtelee maalajien mukaan. Kun vesipitoisuus laskee, vaadittava irrotustyö kasvaa. (Korkka-Niemi & Salonen 1996) Potentiaalienergiaa tarkoitetaan termeillä kokonais-imupaine ja kokonaispotentiaali tai maaveden potentiaali.

Materiaalin vedenpidätyskyky määritetään laboratoriossa pF-laitteistolla. Paineistettussa sellissä on vedellä kyllästetty maanäyte. Sellin nostetaan paine, jolloin näytteessä oleva vesi poistuu ulkopuoliseen keräysastiaan. Sellin pohjalla on vedellä kyllästetty huokoslevy, jonka avulla ilma pysyy sellin sisällä ja paine kohdistuu veteen. Punnituksella saadaan selville, kuinka paljon näytteeseen jäi sitoutunutta vettä käytetyllä sellin paineella. Mittauksia toistetaan, jolloin saadaan yhteys paineen ja vesipitoisuuden välille, eli pF-luku. (Latvala 2018)



Kuva 5. Vedenpidätyskäyrä (Korkka-Niemi & Salonen 1996).

Maassa olevalla vedellä on sekä potentiaali- että kineettistä energiaa. Koska veden liikkumisnopeus maassa on pieni, jätetään liike-energia pois, ja tarkastellaan ainoastaan potentiaalienergian eroja (Kujala 1994). Potentiaalitasolta toiselle siirtymiseen tarvitaan tasojen potentiaalieron suuruinen työ. Kujala (1994) ja Airaksinen (1978) jakavat maaveden potentiaalın kolmeen pääluokkaan: painovoima-, paine- ja osmoottiseen potentiaaliin.

Painovoimapotentiaali johtuu maan vetovoimasta. Potentiaali on positiivinen valitun vertailutason yläpuolella ja vastaavasti negatiivinen sen alapuolella. Vertailutaso voidaan asettaa vapaavalintaisesti ja yleensä nollatasoksi valitaan merenpinta. (Airaksinen 1978)

Osmoottinen potentiaali johtuu maassa olevan veden pitoisuuseroista. Veteen liukee erilaisia aineita, ja pitoisuuserot pyrkivät tasoittumaan. Osmoottinen potentiaali kasvaa, kun veteen liuenneiden aineiden määrä kasvaa. (Airaksinen 1978)

Painepotentiaali kuvaa veden hydrostaattisen paineen tasoa. Vedenpinnan alapuolella olevassa pisteessä vaikuttaa ilmanpaineen lisäksi yläpuolella olevan veden aiheuttama paine. Vertailutaso on pohjaveden pinta. Pinnan alapuolella potentiaali on positiivinen. Pohjaveden pinnan yläpuolella paine on negatiivinen, jolloin käytetään termiä matriisipotentiaali. Matriisipotentiaalia tarkoitetaan myös termeillä matriisi-imupaine ja kapillaaripotentiaali. (Airaksinen 1978)

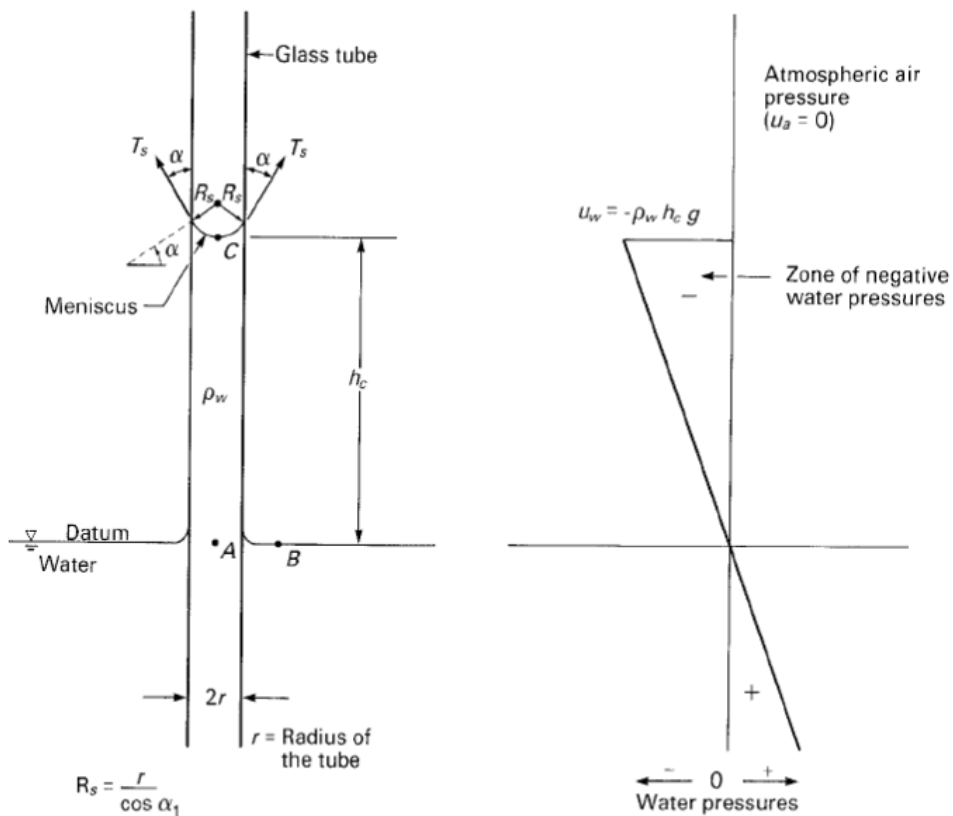
Luonnon systeemit pyrkivät fysiikan lakien mukaan aina tasapainoon. Kun liikutaan pohjaveden pinnasta alaspäin, gravitaatiopotentiaali pienenee ja vastaavasti painepotentiaali kasvaa, mikä mahdollistaa tasapainon (Airaksinen 1978). Myös pohjaveden pinnan yläpuolella olevaan veteen kohdistuvat voimat ovat tasapainossa. Tämä toteutuu, kun gravitaatiopotentiaali kasvaa ja painepotentiaali pienenee. Tämä tasapainotila on pohjana kapillaarisuuden teorialle.

3. KAPILLAARISUUS

3.1 Matriisipotentialiaali ja siihen vaikuttavat tekijät

Painepotentiaalin arvo on negatiivinen pohjavedenpinnan yläpuolella, eli pohjavedenpinnan yläpuolella olevaan veteen kohdistuu painovoiman lisäksi imua. Matriisipotentialiaali on veden potentiaaleista se, joka kuvaa maamateriaalin vaikutusta kapillaariseen nousuun. Kun siihen yhdistetään veteen liuenneista aineista johtuva osmoottinen potentiaali, saadaan kokonaisimupaine eli vedenpidätyskäyrän mukainen irrotustyö (Airaksinen 1978). Seuraavassa käsitellään kahta tärkeintä matriisipotentialiaalin vaikuttavaa tekijää, jotka ovat kapillaariset voimat ja adsorptio.

Yksi osa matriisipotentialista aiheutuu kapillaarisista voimista (Airaksinen 1978, Kujala 1994). Maan huokosrakenne koostuu ohuista kanavista, joita voidaan yksinkertaistettuna käsitellä kuvan 6 kaltaisesti yksittäisenä ohuena putkena. Putki on alapäästä vedenpinnan alla ja yläpäästä avoin.



Kuva 6. Veden nouseminen kapillaariputkessa (vas.) ja huokosveden paine (oik.) (Fredlund et al. 2012).

Veden pintajännitys sekä veden ja putken pinnan välinen adheesio aiheuttavat veden ja ilman rajakohtaan paine-eron. Vedessä vallitseva paine on pienempi kuin ilmanpaine,

mikä ilmenee veden negatiivisena painepotentiaalina. Koska rajapinnan alapuolella on pienempi paine johtuen pintajännitysten resultantista, rajapinnan läheisyyteen virtaa lisää vettä. Vesi alkaa kohota putkessa ylöspäin, sitä ylemmäs mitä pienempi putken halkaisija on. Nousu jatkuu siihen asti, kun matriisi-imupaine on tasapainossa alaspäin vetävän painovoiman kanssa. Ylöspäin vetävä voima kuvataan pintajännityksen resultantina. (Airaksinen 1978, Leivo & Rantala 2000)

Kuvassa 6 oleva kulma α eli veden ja kiinteän aineen välinen rajakulma riippuu pintajännityksistä. Vetojännitys T_S vaikuttaa viistosti ylöspäin. Jännityksen vuoksi veden paine pinnan alapuolella on pienempi kuin ilmanpaine. Paineiden välistä eroa merkitään p_c . Tasapainotilassa pintajännityksen pystysuuntainen komponentti ja paineen resultantti ovat tasapainossa, kun

$$T_S 2 \pi r \cos \alpha + p_c \pi r^2 = 0, \quad (1)$$

jossa T_S on pintajännitys, r on huokoskanavan säde, α on rajakulma ja p_c on paine-ero. Paine-ero eli imupaine vedenpinnan alla voidaan muuttaa vesipatsaan korkeudeksi jakamalla paineen lauseke veden tilavuuspainolla seuraavasti:

$$p_c = - \frac{2 T_S \cos \alpha}{r} \rightarrow h_c = - \frac{2 T_S \cos \alpha}{r \gamma_w}, \quad (2)$$

jossa h_c on kapillaarinen nousukorkeus ja γ_w on veden tilavuuspaino. Rajakulma riippuu veden ja kiinteän aineen ominaisuuksista. Airaksisen (1978) mukaan puhtaan veden ja lasin välinen rajakulma on likimain nolla, jolloin päädytään seuraavaan ainoastaan huokossäteestä riippuvaan nousukorkeuden kaavaan:

$$h = \frac{3 \cdot 10^{-5}}{r}, \quad (3)$$

jossa h on kapillaarinen nousukorkeus ja r on huokossäde (Airaksinen 1978).

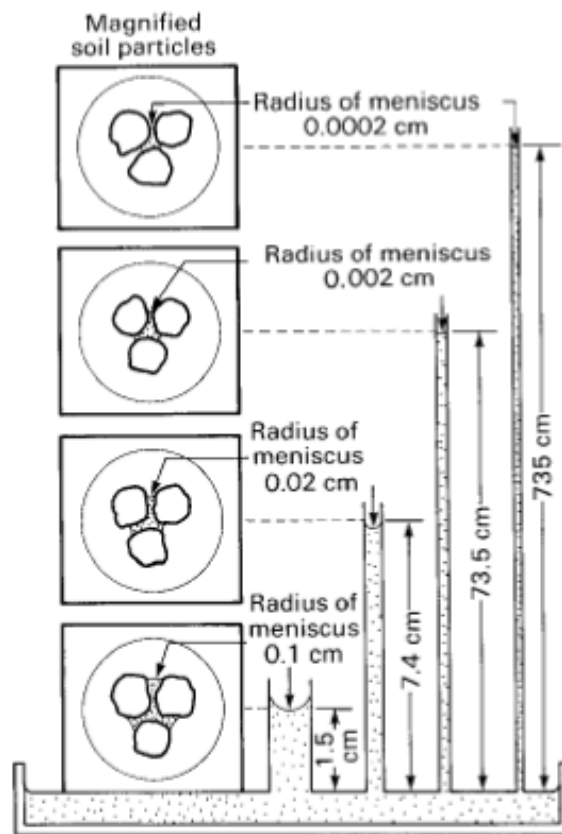
Toinen matriisi-imupaineeseen vaikuttava tekijä on veden ja kiinteän aineen rajapinnalla oleva adsorptio, joka lisää materiaaliin imeytyvän veden määrää (Airaksinen 1978, Kujala 1994). Adsorptiossa vesi sitoutuu kalvoksi maarakeiden pinnoille (Kujala 1994). Joillakin materiaaleilla adsorptio on voimakas, minkä takia matriisipotentiaali kasvaa paljon suuremmaksi kuin ainoastaan kapillaaristen voimien aiheuttama potentiaali (Fredlund et al. 2012). Kapillaarisessa nousussa maahiukkaset vetävät puoleensa vettä. Vesi sitoutuu kalvoksi hiukkasten pinnoille ja supistaa näin huokostilavuutta. Kapillaariset voimat vaikuttavat kapeammassa tilassa kuin ilman adsorptiota, joten myös kapillaarinen nousu on suurempi.

Kapillaarista nousua voidaan arvioida esimerkiksi tietyn raekoon perusteella. Seuraavassa on kokeellisesti määritetty riippuvuus raekokojakauman arvoon d_{10} ja huokoslukuun:

$$h = \frac{C}{e \cdot d_{10}}, \quad (4)$$

jossa h on kapillaarinen nousukorkeus, e on huokosluku, d_{10} on raekokojakaumasta 10 % läpäisyn raekoko ja kerroin C on kokeellisesti määritettävä parametri, jonka suuruus vaihtelee välillä 1...5 (Airaksinen 1978). Tämä arvio soveltuu hiekalle ja soralle (Leivo & Rantala 2000), ilmeisesti siksi, että malli ei ota adsorptiota riittävästi huomioon.

Edellä esitetty teoria antaa suoran yhteyden kapillaariputken säteen ja kapillaarisen nousukorkeuden välille. Saatu yhteys pätee teoriassa myös maa-aineksessa kuvassa 7 esitetyllä tavalla. Maassa olevat huokokset muodostavat ohuita putkia ja verkostoja, joissa vesi liikkuu ylöspäin kapillaarisen nousun takia. Kuvasta havaitaan, että huokossäteen pieneneminen kymmenesosaan nostaa kapillaarisen nousukorkeuden kymmenkertaiseksi. Todellisuudessa huokokset eivät kuitenkaan ole tasakokoisia, vaan huokoskoko vaihtelee (Leivo & Rantala 2000). Sen vuoksi kapillaarisen nousun määrittäminen huokoskoon perusteella on hankalaa.



Kuva 7. Huokossäteen (Radius of meniscus) vaikutus kapillaarisen nousuun (Janssen & Dempsey 1980, Fredlund et al. 2012 mukaan).

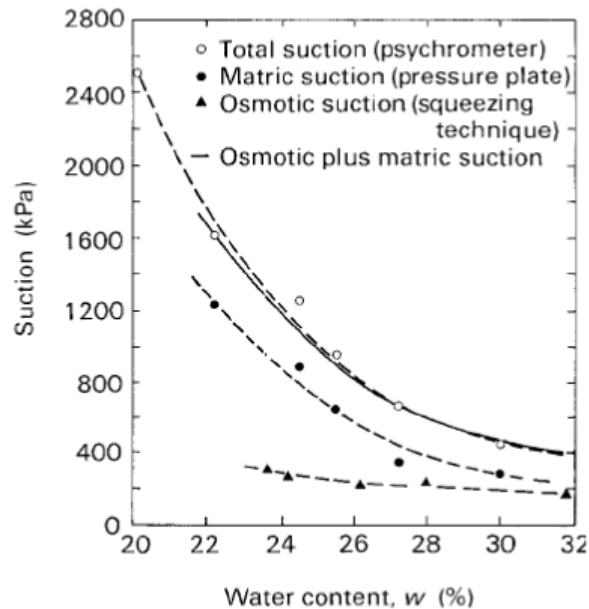
Airaksinen (1978) ja Kujala (1994) lisäävät matriisipotentialiin vaikuttaviin tekijöihin ionien ja maarakeiden välisen vuorovaikutuksen. On vaikea määrittellä, mitä eroa on adsorptiolla sekä ionien ja maarakeiden välisellä vuorovaikutuksella tässä yhteydessä. Adsorptio itsessään johtuu sähköisestä vuorovaikutuksesta, joten tässä työssä nämä luokat

käsitellään samassa. Syvällisemmässä geotekniikassa vedessä olevat ionit ilmeisesti erotellaan itse vesimolekyyleistä, jotka kummatkin ovat samaan aikaan vuorovaikutuksessa maarakeiden pinnan kanssa.

Matriisi- ja osmoottisen potentiaalin summaa nimitetään kokonaisimupaineeksi, joka kuvaa materiaalin kykyä nostaa vettä kapillaarisesti (Isohaka 2014). Tämä kokonaisimupaine vastaa vedenpidätyskäyrän pF-lukua ja määräytyy seuraavasti:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi, \quad (5)$$

jossa ψ on kokonaisimupaine, $(u_a - u_w)$ on ilman ja veden paineiden erotus ja π on osmoottinen imupaine. Kuvassa 8 on eräälle savelle eri kosteuspitoisuuksilla mitatut imupaineet. Tuloksista nähdään, että tutkitulla materiaalilla osmoottisen potentiaalin suuruus ei riipu vesipitoisuudesta ja sen vaikutus kokonaispotentiaaliin on vähäinen verrattuna matriisipotentiaaliin. Osmoottisella potentiaalilla voi kuitenkin olla merkittävä vaikutus lopputulokseen tietyissä olosuhteissa. (Fredlund et al. 2012)



Kuva 8. Kokonais-, matriisi- ja osmoottinen imupaine eräässä savimateriaalissa (Krahn & Fredlund 1972, Fredlund et al. 2012 mukaan).

3.2 Merkittävimmät kapillaarisuuteen vaikuttavat materiaalin ominaisuudet

3.2.1 Huokoisuus

Maan huokoisuus tarkoittaa maarakeiden ympärillä olevan tyhjän tilan määrää, joka on täyttynyt ilmalla tai vedellä (Korkka-Niemi & Salonen 1996). Huokoisuus vaikuttaa siihen, kuinka paljon maahan voi imeytyä vettä. Huokoset voidaan jakaa niiden syntyneen mukaan primääri- ja sekundäärihuokosiin. Primäärihuokoset ovat muodostuneet

maalajin syntymisessä ja sekundaarihuokokset ovat muodostuneet aikojen saatossa valmiissa maassa. Veden virtauksen kannalta oleellisia ovat ainoastaan toisiinsa yhteydessä olevat huokokset. (Airaksinen 1978)

Huokoisuudella ja huokosten ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus kapillaarisuuteen. Seuraavassa on eritelty oleellimmat huokoisuuteen liittyvät kiviaineksen ominaisuudet sekä kiviaineksen mineraaleihin ja lämpötilaan liittyvät asiat.

3.2.2 Raekokojakauma

Hienoaineksen määrällä on suuri vaikutus kapillaariseen nousuun. Kirjallisuudessa hienoaineksella tarkoitetaan raekooltaan alle 0,074 mm ainesta, joka maalajeista vastaa silttiä ja savea (Airaksinen 1978). Matriisi-imupaine on suuri pienten huokosten muodostamassa verkostossa hienoaineksessa, koska adsorptio tapahtuu maarakeiden pinnoilla ja hienossa aineksessa rakeiden pinta-ala on suurempi verrattuna karkeaan ainekseen (Fredlund et al. 2012).

Raekoko määrittää materiaaliin imeytyvän veden määrän ja kapillaarisen nousun yhteyden. Mikäli hienoainesta ei ole raekokojakaumassa ollenkaan, kapillaarista nousua ei tapahdu (Leivo & Rantala 2000). Kapillaarinen nousu voi olla korkea myös suuren raekoon lajitteissa, jos suurien rakeiden ympärillä on tarpeeksi hienoainesta, koska hienoaines muodostaa kapillaarisen nousun verkoston.

Karkearakeisten lajitteiden raekokojakaumaan liittyvät käsitteet lajittuminen ja suhteistuminen. Lajittuneessa materiaalissa rakeet ovat tasakokoisia ja siinä on suurempi huokoisuus verrattuna suhteistuneeseen. Suhteistuneessa materiaalissa raekokojakauma on laajempi ja huokoisuus on pienempi, koska pienemmät rakeet täyttävät isompien väliin jäävää huokostilaa. (Korkka-Niemi & Salonen 1996). Tämän seurauksena suhteistuneet materiaalit ovat todennäköisemmin kapillaarisia kuin lajittuneet, koska niissä on enemmän pienten huokosten muodostamaa verkostoa.

3.2.3 Rakeiden muoto ja tiiviysaste

Rakeiden muodossa oleellista on se, kuinka isommat rakeet jättävät pienemmille tilaa ja miten pienet rakeet täyttävät huokostilan. Teoriassa pienemmät rakeet pääsevät täyttämään isompien välit tehokkaimmin, kun rakeet ovat pallomaisia. Muotoasia ei kuitenkaan ole niin yksiselitteinen, sillä levymäiset hiukkaset johtavat joissain tapauksissa suurempaan imuun.

Korkka-Niemi & Salonen (1996) mukaan pallomaiset maarakeet johtavat pienempään huokoisuuteen kuin levymäiset. Suhteistuneessa materiaalissa pallomaiset rakeet täyt-

tävät huokostilan tehokkaammin kuin pitkulaiset. Teoriassa voisi ajatella, että lajittuneessa materiaalissa optimaalinen raemuoto olisi kuutiomainen, jolloin rakeet tiivistyisivät toisiinsa kiinni.

Tiivistymisessä eri muotoiset rakeet käyttäytyvät eri tavoin. Pallomaiset rakeet eivät pakkaudu yhtä tiiviisti kuin keskenään samansuuntaiset levymäiset rakeet. Levymäiset savipartikkelit muodostavat tiivistyessään ryhmiä, joissa partikkelit ovat tiukasti lähekkäin ja muodostavat kapeita huokosia. Ryhmien väliin jää huokostilaa. (Wan et al. 1995)

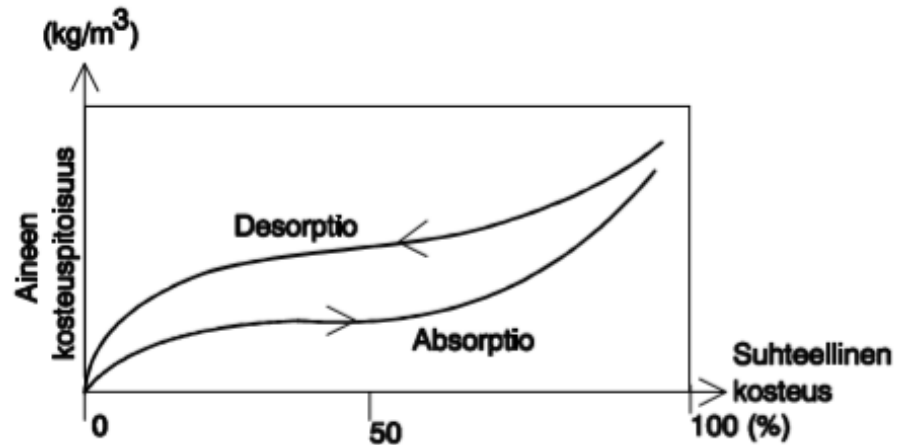
3.2.4 Mineraalit

Maarakeiden pinnan ja veden välillä tapahtuu kemiallisia reaktioita. Veteen liukenee mineraaleista hiukkasia, minkä takia puhdasta vettä sitoutuu osmoottisesti tasapainottamaan pitoisuuseroja. Osmoottinen imu vaikuttaa kokonaisimuun, mutta toisaalta osmoottisen imun muutos vesipitoisuuden mukaan on vaikutukseltaan pieni verrattuna matriisi-imun muutokseen (Fredlund et al. 2012). Kirjallisuudesta löytyneiden esimerkkien perusteella osmoottisellakin imulla on joissakin tapauksissa merkitystä.

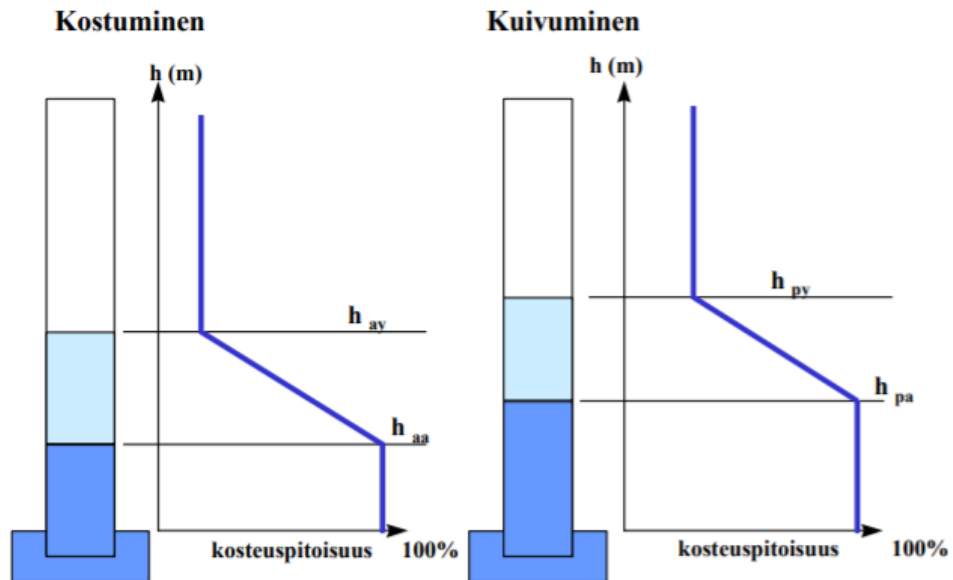
Zimmermannin vuonna 1936 (Rethati 1983 mukaan) tekemässä kokeessa kahden eri mineraalikoostumuksen näytteet samalla raekoolla johti eri nousukorkeuksiin. Kyseisessä kokeessa toinen näyte oli 99,1-prosenttisesti piidioksidia ja toinen sisälsi 63,4 % piidioksidia ja 24,4 % alumiinioksidia. Eroa nousukorkeudessa oli noin 30-40 % ja alumiinioksidilla on suurempi vedenimu kuin piidioksidilla. (Rethati 1983)

3.2.5 Kostumisen ja kuivumisen ero

Kapillaarisuuteen ja veden sitoutumiseen liittyy hystereesi-ilmiö. Materiaalin kosteusvaihtelut käyttäytyvät eri tavalla kostumisessa ja kuivumisessa. Tämä periaate on esitetty kuvissa 9 ja 10. Kun materiaali kuivataan ennen kostumista, tasapainokosteus jää alemmalle tasolle kuin jos kyllästetty materiaali annetaan kuivua tasapainokosteuteen. (Airaksinen 1978, Leivo & Rantala 2000)



Kuva 9. Kostumisen (absorptio) ja kuivumisen (desorptio) ero vedenpidätykskäyrässä (Leivo & Rantala 2000).



Kuva 10. Kapillaarisen nousukorkeuden periaate kostumisessa ja kuivumisessa. (Leivo & Rantala 2000)

Kostumisen ja kuivumisen ero perustuu kapillaaristen voimien riippuvuuteen huokosen koosta. Kapillaarinen voima on suurempi pienessä kuin suuressa huokosessa. Kostumisessa nousukorkeutta rajoittavat suurimmat huokokset, joissa kapillaariset voimat eivät vaikuta. Kuivatussa näytteessä vesi on poistunut mikrohuukosista (vesikalvon puuttuminen), joihin kapillaarisesti nouseva vesi ei pääse ja yhtenäinen vedellä täytynyt huokosverkosto katkeaa. Kuivumisessa nousukorkeus määräytyy pienimpien huokosten mukaan. Kuivumisessa vettä jää sitoutuneeksi pienimpiin huukosiin, jolloin niiden alapuolella olevat isommat huokokset pysyvät täynnä. Pienet huokokset pidättävät vettä materiaaliin. Lisäksi vettä jää umpinaisiin huukosiin, joiden yhteys muuhun verkostoon katkeaa. (Leivo & Rantala 2000)

3.2.6 Lämpötila

Maan ja veden lämpötila vaikuttaa niiden ominaisuuksiin ja siten myös kapillaarisuuteen, mutta vaikutusta ei voida yksiselitteisesti määrittää. Seuraavassa on eri tutkimuksissa ilmenneitä asioita lämpötilan vaikutuksesta.

Leivon ja Rantalan (2000) tutkimuksessa on mitattu eri materiaalien tasapainokosteuksia kahdessa eri lämpötilassa, +5 °C ja +20 °C. Fillerillä ja hienoainespitoisuudeltaan noin 16 % olevalla moreenilla +20 °C lämpötilassa mitatut tasapainokosteudet ovat pienempiä kuin +5 °C lämpötilassa. Sen sijaan tutkituilla soralla, salaojasoralla ja sepelillä lämpötilan vaikutus oli päinvastainen. Niillä korkeampi lämpötila tuotti suuremmat tasapainokosteuden arvot. Rakeisuudeltaan näiden kahden ryhmän väliin sijoittuvalla karkealla hiekalla eri lämpötiloissa mitatut tasapainokosteudet olivat lähellä toisiaan. (Leivo & Rantala 2000)

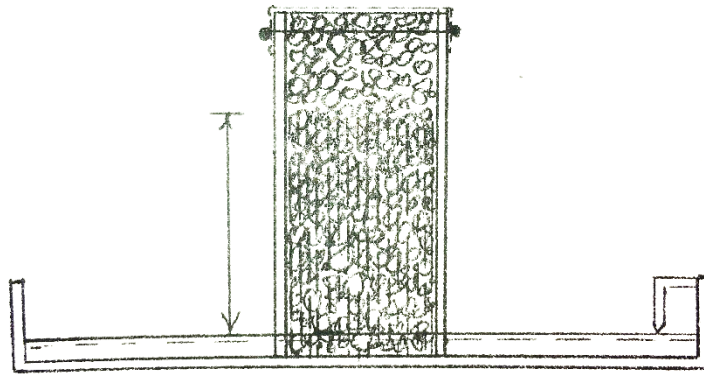
Wan et al. (1995) on havainnut, että tutkimuksessa käytetyllä hiekan ja saven seoksella matriisipotentiaali pienenee lämpötilan noustessa. Tämä havainto on hienojen maalajien osalta saman suuntainen kuin Leivon ja Rantalan (2000) työssä. Lämpötilan noustessa veden pintajännitys pienenee, jolloin kapillaarinen voima pienenee ja pitäisi johtaa alhaisempaan nousukorkeuteen. Toisaalta veden viskositeetti pienenee lämpötilan noustessa, mikä taas edesauttaa veden virtausta huokosissa. Lämpötilan vaikutus on monimutkainen ja esimerkiksi Leivo ja Rantala (2000) ja Wan et al. (1995) eivät ole löytäneet yksiselitteistä ratkaisua tähän.

3.3 Kapillaarisuuden mittausmenetelmät

Kapillaarinen nousukorkeus voidaan määrittää laboratoriossa nousukokeella, jossa veden annetaan nousta kuivaan näytteeseen. Kokeen järjestely on esitetty kuvassa 11. Tutkittava näyte sullotaan läpinäkyvään putkeen, jonka halkaisija määräytyy näytteen raekoon perusteella. Putki asetetaan vesialtaaseen siten, että materiaalin alapinta on veden pinnan alla. Veden annetaan nousta näytteeseen ja kun nousu on pysähtynyt, kapillaarinen nousukorkeus saadaan suoraan osittain kyllästyneen ja kuivan materiaalin rajakohdasta ja voidaan mitata mittanauhalla. Nousukoe soveltuu myös karkearakeisille näytteille, joilla käytetään halkaisijaltaan suurempaa putkea. (Jääskeläinen 2009) Silmä-määräisesti erottuva kostean ja kuivan materiaalin rajapinta vastaa ylempää kapillaarista nousukorkeutta (Leivo & Rantala 2000).

Kapillaarisen nousun nopeus ja imeytyvän veden määrä voidaan määrittää punnitsemalla näytettä. Painon lisäys vastaa imeytyneen veden painoa. Kun nousu on pysähtynyt lopulliseen arvoonsa, näyte jaetaan kerroksittain osiin ja osat punnitaan. Näin saadaan lopullinen kosteuspitoisuus korkeuden funktiona. Vesipitoisuuksia voidaan mitata myös

nousun aikana käyttämällä näytteeseen asennettuja kosteusantureita (Leivo & Rantala 2000)



Kuva 11. Kapillaarisen nousukokeen periaate (Jääskeläinen 2009).

Nousukokeen suorittamiseen liittyy muutamia huomioitavia asioita. Kokeessa käytetään yleensä kuivattua näytettä (Leivo & Rantala 2000), mutta adsorption vaikutus ei ole samanlainen kuivassa ja osittain kosteassa maassa. Kuivassa näytteessä maarakeiden ympärillä ei ole adsorptioveittä kalvona. Vesi on puhdasta toisin kuin luonnossa ja esimerkiksi tierakenteissa suolauksen takia. Rethatin (1983) mukaan näytteessä ei ole luonnollisia maan adsorptio-ominaisuuksia ja energiaa kuluu näytteen kastumiseen, olosuhteet eivät vastaa todellisia tiiviyden ja kosteuspitoisuuden osalta ja lisäksi kokeessa käytettävä putki vaikuttaa kapillaariseen nousuun. Kokonaisuudessaan nousukoe on kuitenkin pätevä keino kapillaarisuuden mittaamiseen ja edellä mainitut puutteet ovat vai kutukseltaan pieniä.

Kapillaarisuuden mittaamiseen voidaan käyttää myös kapillaarimetriä. Kapillaarimetrisä käytetään ohutta näytettä (noin 2 cm), joka on kyllästetty vedellä. Näyte asetetaan sylinteriin, jonka yläpää on vapaana. Näytteen alapuolelle imetään pumpulla alipaine. Alipainetta kasvatetaan ja tietyllä paineen arvolla näytteen läpi alkaa virrata ilmaa. Koe perustuu siihen, että imupaine, jolla ilma pääsee näytteen läpi, on sama paine, jolla vesi on sitoutunut maahan. Tämä paine muutetaan laskennallisesti kapillaariseksi nousukorkeudeksi. (Jääskeläinen 2009)

Todellisuudessa kapillaarimetri ei anna täysin oikeaa kuvaa materiaalin kapillaarista nousukorkeudesta. Ilman kulkiessa näytteen läpi suurimmat huokokset avautuvat, mutta kapillaaristen voimien takia pienimmät huokokset pysyvät edelleen kiinni veden kylästäminä. Kapillaarimetriä ei voida käyttää karkearakeisille lajitteille (Leivo & Rantala 2000, Jääskeläinen 2009). Kapillaarimetristä riippuen suurin rakeisuus voi olla esimerkiksi 2 mm tai 8 mm (Tielaitos 1993b).

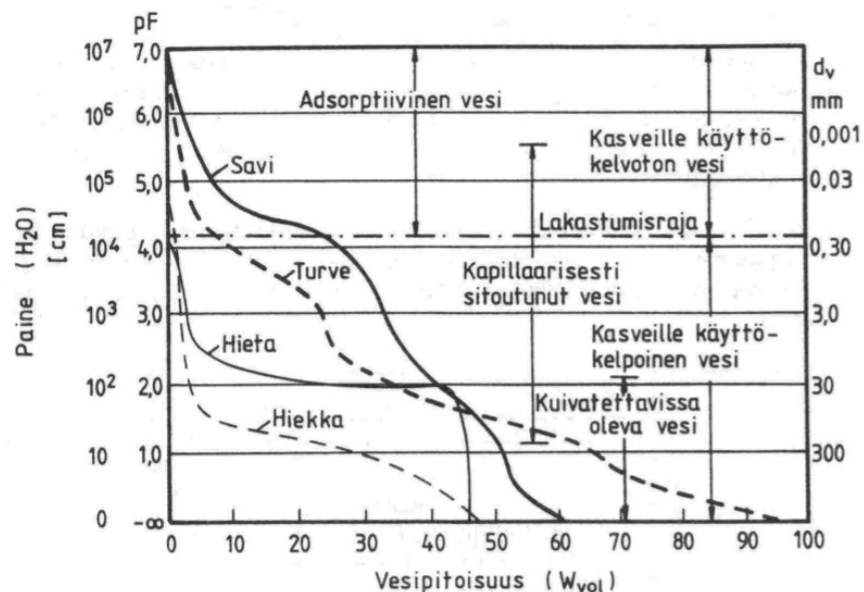
4. MATERIAALIKOHTAISIA OMINAISUUKSIA

4.1 Luonnon lajittamat materiaalit

Luonnon muokkaamia materiaaleja ovat savet, siltit, hiekat, sorat ja moreenit. Kapillaarisen nousun kannalta määräävä tekijä on materiaalin hienoainespitoisuus. Savessa ja siltissä on paljon hienoainesta ja niissä kapillaarinen nousu on tyypillisesti suuri. Hiekka ja sora ovat lajittuneita materiaaleja, joissa hienoainespitoisuus on tavallisesti pieni, tai hienoainesta ei ole. Yleensä kuitenkin hienoa ainesta on joukossa jonkin verran ja kapillaarisen nousun esiintyminen on mahdollista näissäkin materiaaleissa kuten seuraavassa esiteltävissä tutkimuksissa käy ilmi.

Moreeneissa hienoainespitoisuus vaihtelee. Pohjamoreeni sisältää yleensä runsaasti hienoainesta. Pintamoreeni sisältää yleensä enemmän kiviä ja vähemmän hienoainesta. Tämän vuoksi yleensä pintamoreeni soveltuu paremmin murskaukseen ja rakennekerroksien materiaaliksi. Moreeniesiintymissä materiaali voi paikoitellen olla myös lajittunutta. Kapillaarisuuden kannalta moreeneissa merkittävin vaikutus on hienoainespitoisuudella. (Tielaitos 1993)

Luonnontilaisissa materiaaleissa on mahdollisesti humusta joukossa, joka imee pienillä imupaineilla runsaasti vettä kuvan 12 mukaisesti (Kujala 1994) ja vaikuttaa siten kapillaarisuuteen. Humuspitoisuuteen ei kuitenkaan ole kirjallisuudessa juurikaan otettu kantaa, joten sen voidaan päätellä tulevan kyseeseen poikkeustapauksissa.



Kuva 12. Eri materiaalien vedenpidätyskäyriä (Kujala 1994).

Savella matriisi-imupaineeseen vaikuttaa eniten adsorptio ja karkeammilla maalajeilla kapillaariset voimat ovat määräävä tekijä (Airaksinen 1978). Maalajin raekoko ja hienoaineksen osuus vaikuttavat suorasti maalajin kapillaariseen nousukorkeuteen, mikä on nähtävissä taulukoihin 1 – 4 kootuissa arvoissa. Raekoon pienentyessä ja hienoainespitoisuuden kasvaessa kapillaarinen nousu kasvaa. Korkeuden vaihteluvälien limittyminen kertoo, että nousukorkeuteen vaikuttaa muitakin tekijöitä raekoon lisäksi.

Taulukko 1. Maalajien huokoisuus ja kapillaarinen nousu, kirjallisuudessa olevat yleiset arvot (Airaksinen 1978).

Maalaji	Huokoisuus (%)	Kapillaarinen nousukorkeus (cm)	
		Löyhä	Tiivis
Hieno sora	25...38	1...5	1...5
Karkea hiekka	30...46	3...12	4...15
Hiekka	26...53	10...35	12...50
Hieno hiekka		30...200	40...350
Karkea siltti	30...35	150...500	250...800
Hieno siltti	40...50	400...1000	600...1200
Savi	34...70	>800	>1000

Leivon ja Rantalan (2000) työssä on mitattu luonnonmateriaalien kapillaarista nousua ja tulokset on koottu taulukkoon 2. Taulukossa oleva hienoainespitoisuus on alle 0,074 mm raekoon alittavan aineksen osuus.

Taulukko 2. Tutkittujen maalajien rakeisuus ja kapillaarinen nousu (Leivo & Rantala 2000).

Maalaji	Rakeisuus (mm)	Hienoainespitoisuus (%)	Huokosluku	Kapillaarinen nousu (cm)
Filleri	0–4	5,5	0,6	60
Karkea hiekka	0–8	0,3	0,5	25
Salaojasora ohjealue I	1–16 pesty	0		5
Salaojasora ohjealue II	0–16 ei pesty	1,3	0,45	50
Hiekkamoreeni	0–64	15	0,3	>70

Leivon ja Rantalan (2000) tutkimuksessa huomiota herättää ohjealueen II salaojasoran toiminta. Sen hienoainespitoisuus oli 1,3 %, mikä oli riittävästi aiheuttamaan noin

50 cm korkean kapillaarisen nousun. Samasta materiaalista tehdyn pestyn lajikkeen nousukorkeus oli vain noin 5 cm. Toisaalta raekoon 0–16 sepelissä, joka koostui pääasiassa 4–8 mm aineksesta ja jonka hienoainespitoisuus oli 0,4 %, nousua ei havaittu ollenkaan. (Leivo & Rantala 2000) Tästä voidaan päätellä, että hienoainespitoisuudella on suurempi merkitys kuin raekolla.

Tielaitos on tutkinut eräiden kohteiden pohjamaan ominaisuuksia. Pohjamaasta otetuille näytteille on määritetty kapillaarinen nousu kapillaarimetrillä. (Ahonen et al. 1996)

Taulukko 3. Eräiden kohteiden pohjamaan ominaisuuksia: raekoko, hienoainespitoisuus ja kapillaarinen nousukorkeus (Ahonen et al. 1996).

Materiaali	Raekoko (mm)	<0,074 mm (%)	Nousukorkeus (m)
SrHkMr (Pello)	0–16	24	3,4
HkSi (Ranua)	0–1	54	5,3
SaSi (Rantsila a)	0–2	82	3,9
SaSi (Rantsila b)	0–2	92	6,2
SaSi (Temmes)	0–2	82	6,0
Si (Temmes)	0–1	77	1,4

Pienin nousukorkeus 1,4 m tutkituissa materiaaleissa oli Temmeksen pohjamaan silissä. Siinä nousukorkeus oli noin puolet verrattuna Pellon soraiseen hiekkamoreeniin. Tästä voidaan päätellä, että lajitteen suurimmalla raekolla ei ole välttämättä merkitystä kapillaariselle nousulle. Rantsilan kaksi näytettä ovat ominaisuuksiltaan hyvin samanlaisia, mutta silti niiden kapillaarisissa nousuissa on huomattava ero. Tämän voisi selittää ero materiaalien hehikutushäviöissä. Näytteelle a hehikutushäviö oli 2,9 % ja b-näytteelle 4,2 %, mikä tarkoittaa, että b-näytteessä oli suurempi humuspitoisuus. Humuksen määrä vaikuttaa ilmeisen voimakkaasti kapillaariseen nousuun. (Ahonen et al. 1996)

Li et al. (2018) julkaisussa esitetään tuloksia mittauksista, jossa on mitattu erilaisissa maanäytteissä kapillaarista nousua suoralla nousukokeella. Tutkimuksessa on selvitetty yhtenä kysymyksenä tiiviysasteen vaikutusta nousukorkeuteen, jotka on mitattu erikseen 90 %, 85 % ja 80 % tiiviysasteissa. (Li et al. 2018)

Taulukko 4. Tiiviysasteen ja materiaalin vaikutus kapillaariseen nousuun (Li et al. 2018).

Näyte	Hienoainespitoisuus (%)	Nousukorkeus (m)		
		90 %	85 %	80 %
Tiiviysaste				
Sa "CHE"	92,5	3,91	3,58	3,39
Sa "CH"	90,2	3,55	3,34	3,15
Sa "CL"	85,8	3,31	3,17	3,01
Si	64,5	2,93	2,67	2,39
SiSa	30,2	1,94	1,81	1,59
Hk (hieno)	15,5	- (ei mitattu)	1,40	1,21
Hk (keskikarkea)	5,0	-	0,91	0,81
Hk (karkea)	1,4	-	-	0,73

Tämän tutkimuksen korkeuden arvot vaikuttavat hiekkänäytteiden osalta melko korkeilta verrattuna edellisiin kotimaisiin tutkimuksiin. Kapillaarinen nousu suurenee rae-koon pienentyessä, hienoainespitoisuuden kasvaessa ja tiiviysasteen kasvaessa. Tiiviysasteen vaikutus näyttää olevan yhtä voimakas eri maalajeissa, eli tiivistys nostaa nousua suunnilleen samassa suhteessa.

4.2 Murskatut kiviainekset

Rakentamisessa käytetään kallio- ja soramursketta. Kalliomurske on kallioista louhitua ja murskattua kiviainesta ja soramurske vastaavasti luonnonsorasta jalostettua. Soran ja hiekan otto harjuista vähenee ja kalliomurskeen käyttö lisääntyy, koska soranotto-alueet sijaitsevat harjuilla, joita pyritään säästämään pohjavesialueiden ja maisemallisten arvojen takia.

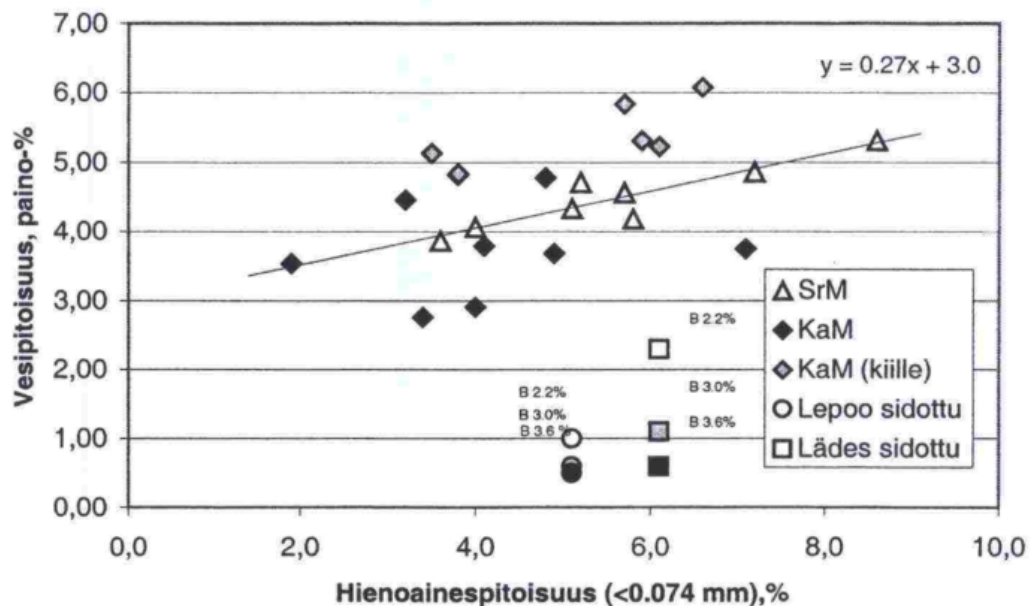
Murskatun aineksen rakeet ovat luonnonmateriaaleihin verrattuna teräväreunaisia, särmikkäitä, pitkulaisia ja litteitä sekä rakeiden pinnat ovat karkeita. Rakeiden muoto vaikuttaa huokostilaan. Murske sisältää murskauksessa ja seulomisessa kivipartikkeleiden pinnalta irronnutta hienoainesta. Juuri murskatun aineksen rakeiden pinnoilla tapahtuu kemiallisia reaktioita toisin kuin luonnon lajittamissa materiaaleissa. (Nurmikolu 2004)

Käytön aikana kalliomurske saattaa hioutua kuormituksen vaikutuksesta. Kun hienoaineella on pieni vedenläpäisevyys, suurempien partikkelien väleihin kertyy vettä, joka toistuvan kuormituksen alla hioo entisestään partikkeleita. Tätä tapahtuu varsinkin ratarakenteissa. (Nurmikolu 2004) Kun huomioidaan kalliomurskeelle ominaiset terävät särmät, voidaan päätellä, että käytön aikainen kuluminen kalliomurskeessa lisää sen kapillaarisuutta ainakin jonkin verran.

Murskatusta materiaalista saadaan seulomalla ja pesemällä kapillaarikatko- ja salaojakerroksiin soveltuvaa ainesta, jossa kapillaarista nousua ei ole juurikaan. Näiden materiaalien kapillaarinen käyttäytyminen on samanlaista kuin esimerkiksi Leivon ja Rantalan (2000) tutkimuksen pestyllä salaojasoralla.

Murskeille ei löydy kirjallisuudesta yhtä paljon nousukokeiden tuloksia kuin luonnonmateriaaleille. Sen sijaan murskeille tehtyjä TS-testejä eli imupainekokeita löytyy (Tielaitos 1993a, Ylitapio 1998, Saarenketo et al. 2001, Nurmikolu 2004). TS-testillä selvitetään materiaalin vedenimuominaisuuksia ja tulos vastaa materiaaliin kapillaarisesti imeytyvän veden määrää. TS-testin lopussa mitattu vesipitoisuus ei kerro kapillaarista nousukorkeutta, mutta antaa silti kuvan kapillaarisuuden voimakkuudesta. Ilmeisesti kapillaarinen nousukorkeus ei ole ongelma kalliomurskeissa vaan enemmänkin absorption voimakkuus, eli kuinka paljon materiaali imee vettä itseensä. Leivo ja Rantala (2000) ovat tutkinut ainoastaan luonnonmateriaaleja, ehkä siksi, ettei kalliomurskeen käyttö ollut silloin vielä yhtä hallitsevaa kuin nykyään.

Saarenketo et al. (2001) on tutkinut hienoainespitoisuuden ja materiaaliin kapillaarisesti imeytyvän veden määrän yhteyttä sitomattomissa ja bitumilla sidotuissa kallio- ja soramurskeissa. Hienoainespitoisuuden ja imukokeessa saatu vesipitoisuus on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Hienoainespitoisuuden vaikutus imeytyvän veden määrään (Saarenketo et al. 2001).

Tutkimuksessa käytettyjen soramurskeiden hajonta oli huomattavasti pienempää kuin kalliomurskeilla. Tästä ei kuitenkaan voi suoraan päätellä soramurskeiden kapillaarisuuden olevan tasaisempaa kuin kalliomurskeilla. Vaihteluun vaikuttaa se, että käytetyissä kalliomurskeissa oli paljon murskauksen jälkeistä pintaa, jossa kemialliset reaktiot olivat

vielä voimakkaita (Saarenketo et al. 2001). Myös soramurskeessa saattaa olla voimakkaita kemiallisia reaktioita murskauksen jälkeen. Kiillepitoisella kalliomurskeella saavutettiin selkeästi suuremmat veden imeytymisen arvot, kuin vähän kiillettä sisältävällä murskeella. Kiillepitoisuus vaikuttaa osmoottiseen imupaineeseen. Huomionarvoista on myös, että murskeen sitominen bitumilla alentaa imeytyvän veden määrää jo muutaman prosentin bitumipitoisuuksilla. (Saarenketo et al. 2001)

Tielaitoksen (1993a) tutkimuksessa on mitattu kapillaarista nousua eri kalliomurskeissa. Kapillaarisuus on määritetty nousukokeella ja veden absorptio on määritetty hienoainekselle 5 vrk:n pituisella imeytyksellä. Tulokset ovat taulukossa 5. Tutkimuksessa on selvitetty erityisesti murskeiden tiivistymisen ja hienonemisen vaikutusta lujuuteen ja vedenimuominaisuuksiin. Murskeiden hienoainespitoisuudet on arvioitu rakeisuuskäyrästä. (Tielaitos 1993a)

Taulukko 5. Kapillaarinen nousu eri kalliomurskeissa raekooltaan 0–64 mm (Tielaitos 1993a).

Materiaali	Hienoainespit. (%)	Absorptio (%)	Nousukorkeus (m)
Nurmo	3	0,28	0,61
Alakylä	3	0,44	0,78
Jaara	3	0,51	0,81
Sievi	4	0,97	1,10

Sievin murskeessa oli suurin hienoainepitoisuus ja myös selvästi suurin kapillaarinen nousukorkeus. Hienoaineksen absorptio ja koko näytteen nousukorkeus käyttäytyivät samalla tavalla. Veden imeytymisen ja nousukorkeuden erot voivat johtua eroista mineraalikoostumuksissa. Sievin murske sisälsi amfibolia ja epidootia, joita ei ollut muissa. Vastaavasti Jaaran murskeessa oli kalimaasälpää. Lisäksi Sievin murskeessa oli suurempi hehkutushäviö kuin muissa, mikä selittää osaltaan suuremman kapillaarisen nousun. Kokeessa havaittiin myös, että jyräämällä tehdyllä tiivistyksellä on vaikutus veden absorptioon, mutta yhteys ei ollut selkeä. (Tielaitos 1993a) Mineraaleista ainakin kiilteille on ominaista voimakas vedenimu (Ylitapio 1998). Kiilteisiin kuuluvia muskoviittia ja biotiittia sisälsivät eniten Nurmon ja Alakylän murskeet, mutta näissä nousukorkeudet olivat alhaisimmat (Tielaitos 1993a).

Tielaitoksen tutkimuksessa (Ylitapio 1998) on mitattu TS-kokeella murskeiden imupaineita raekoolle 0-18 mm 200 mm korkeille näytteille. Jokaiselle materiaalille on tehty kolme mittausta, joista taulukossa 6 on lueteltuna jokaisen materiaalin keskimääräinen mittaustulos.

Taulukko 6. Eri sora- ja kalliomurskeiden vedenimuoimaisuudet (Ylitapio 1998).

Materiaali	Laatu	<0,074 mm (%)	Huokos-luku	Materiaaliin imeytynyt kosteus (%)
Vuontisrova KaM	Hyvä, korkea CEC	4,0	0,47	2,91
Peurakallio KaM	Hyvä	4,1	0,41	3,79
Saattopora SrM	Epäilyttävä	5,1	0,28	4,33
Palovaara SrM	Ongelmallinen	5,2	0,27	4,71
Tohmoaara KaM	Hyvä	3,8	0,33	4,82
Hietavaara SrM	Hyvä	7,2	0,24	4,86
Lampeltmos-sen KaM	Ongelmallinen (kiillerikas)	5,9	0,25	5,31
Vuorenmaa KaM	Ongelmallinen (kiillerikas)	5,7	0,25	5,84

Ennen imupaineiden mittausta oli tiedossa eräiden näytteiden ongelmallisuus. Käytössä oli havaittu poikkeavan suurta veden imeytymistä ja ne sisälsivät kalsiumia, magnesiumia ja kiillettä. Hyvälaatuisiksi luokitellut oli aikaisemmissa tutkimuksissa ja käytössä todettu hyvälaatuisiksi. (Ylitapio 1998)

Tielaitoksen TS-testin tuloksissa on huomioitavaa, että materiaaliin imeytyvä kosteus ei ole suoraan riippuvainen hienoainespitoisuudesta. Suurimmat kosteuspitoisuudet saavutettiin kahdella kiillerikkaalla kalliomurskenäytteellä. Näillä murskeilla imupaine oli suurempi kuin Hietavaaran murskeella, jossa oli suurin hienoainespitoisuus. Tämä kertoo kiillepitoisuuden vaikutuksesta. Testissä ilmennyt suurin vesipitoisuus oli noin kaksinkertainen pienimpään verrattuna. (Ylitapio 1998)

5. YHTEENVETO

Maaperässä kapillaarisuus vaikuttaa osittain kyllästyneessä vyöhykkeessä pohjaveden pinnan yläpuolella. Vesi voi nousta pohjarakenteisiin kapillaarisesti, jos pohjaveden pinta on tarpeeksi ylhäällä ja kapillaarinen nousu pohjamaassa ja rakenteissa käytetyissä materiaaleissa on riittävän korkea. Vesi sitoutuu maahan ja kiviainekseen adsorptiolla, kapillaarisilla voimilla ja osmoottisesti. Veden potentiaali eli sitoutumisen voimakkuus vaihtelee eri vesipitoisuuksilla. Veden kapillaarisen nousun kannalta potentiaaleista olennaisia ovat matriisi- ja osmoottinen potentiaali. Matriisipotentiaaliin vaikuttavat kapillaariset voimat ja adsorptio ja se ilmenee huokosveden negatiivisena paineena. Imupaine pitää kapillaarisesti nousevan veden tasapainossa painovoiman kanssa.

Tämän kirjallisuustutkimuksen perusteella voidaan todeta, että tärkein kiviaineksen kapillaarisuuteen vaikuttava tekijä on materiaalin hienoainespitoisuus. Savi- ja silttimateriaaleissa kapillaarinen nousu on luonnollisesti korkea. Kiviaineksessa esimerkiksi muutaman prosentin hienoainespitoisuus voi aiheuttaa korkean kapillaarisen nousun verrattuna hienoainesta sisältämättömään materiaaliin. Materiaalin raekoko ei ole yhtä merkittävä tekijä kuin hienoainespitoisuus.

Toinen laajasti esille tullut tekijä on mineraalikoostumus. Erilainen mineraalikoostumus voi aiheuttaa korkeamman kapillaarisen nousun, vaikka hienoainespitoisuus ei olisi suuri. Mineraalikoostumuksen vaikutus on tullut esille tässä työssä käsitellyissä kallio- ja soramurskeelle tehdyissä vedenimutesteissä, mutta sen taustalla vaikuttaviin asioihin ei ole otettu kantaa. Korkealla kiillepitoisuudella on havaittu yhteys voimakkaaseen veden imeytymiseen. Muita kapillaarisuuteen vaikuttavia tekijöitä on käsitelty kirjallisuudessa vähemmän. Löytyneiden tietojen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että kiviaineksen kapillaarisuuteen vaikuttavat raekokojakauma, hienoainespitoisuus, rakeiden muoto, tiivysaste, kiviaineksen mineraalit, humuspitoisuus, lämpötila, sekä se onko materiaali kuivumassa vai kastumassa.

Kapillaarisuutta nousua mitataan nousukokeella ja kapillaarimetrillä, joista nousukoe on luotettavampi menetelmä. Lisäksi tähän kirjallisuuskatsaukseen otettiin mukaan murskeille tehtyjä imupainekokeita kapillaarisuuden voimakkuuden selvittämiseksi, koska nousukokeita oli kirjallisuudessa niukasti saatavilla.

Nousukokeiden vähäiseen määrään voi vaikuttaa se, että kalliomurske ja soramurske mielletään heikosti kapillaarisiksi materiaaleiksi. Kapillaarinen nousu on murskeissa yleensä alhaisempi verrattuna esimerkiksi silttipitoisiin moreeneihin, mikä tarkoittaa, että

kapillaarinen nousu tie- ja pohjarakenteisiin saadaan katkaistua suhteellisen matalilla rakennekerroksilla. Rakenteissa käytetään yleensä kapillaarikatkoa katkaisemaan veden kapillaarinen nousu pohjamaasta rakenteisiin, jolloin itse rakennekerrosten kapillaarisuudella ei ole suurta merkitystä varsinkaan hyvin vettä läpäisevillä murskeilla. Tie- ja rata-penkereissä kerrospaksuudet ovat lisäksi suuria routimisen ehkäisemiseksi. Toisaalta kalliomurskeessakin saattaa olla haitallista kapillaarista veden imua ja nousua.

Tässä kirjallisuusselvityksessä selvitettiin perusasiat kiviaineksen kapillaarisuuteen liittyen. Aiheeseen liittyen jatkotutkimukselle on tarvetta kierrätysmateriaaleissa kuten betoni- ja asfalttimurskeissa, sekä muissa maa- ja pohjarakentamisessa käytettävissä materiaaleissa kuten esimerkiksi kevytsorassa. Lisäksi kapillaarisuuden tutkiminen erilaisissa kostumis- ja kuivumisolosuhteissa olisi hyödyllistä, kun vertailukelpoisten tulosten saamiseksi kokeita tehdään kuivatuille näytteille.

LÄHTEET

Ahonen, M., Huttunen, E., Kujala, K. (1996). Koerakennekohteiden materiaalien routakestävyys. Tielaitoksen selvityksiä 37/1996. Helsinki.

Airaksinen, J. (1978). Maa- ja pohjavesihydrologia. Pohjoinen, Oulu.

Fredlund, D., Fredlund, M., Rahardjo, H. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, New Jersey.

Isohaka, M. (2014). Veden saatavilla olon vaikutus radan routivuuteen. Diplomityö. TTY, Tampere.

Jääskeläinen, R. (2009). Geotekniikan perusteet. Tammertekniikka, Tampere. 332 s.

Korkka-Niemi, K., Salonen, V. (1996). Maanalaiset vedet – pohjavesigeologian perusteet. Turun yliopisto, Turku.

Kujala, K. (1994). Routanousun mallintaminen. Tielaitos, Oulu.

Latvala, J. (2018). Radan kuivatuksen toimivuuden arviointi ja parantaminen olemassa olevilla radoilla. Liikennevirasto, Helsinki.

Leivo, V., Rantala, J. (2000). Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen. TTKK, Rakennustekniikan osasto, Tampere.

Li, Y., Zhang, C., Chen, C., Chen, H. (2018). Calculation of Capillary Rise Height of Soils by SWCC Model. Advances in Civil Engineering. New York.

Nurmikolu, A. (2004). Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. Ratahallintokeskus, Helsinki.

Rethati, L. (1983). Groundwater in civil engineering. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Saarenketo, T., Kolisoja, P., Vuorimies, N., Ylitapio, S. (2001). Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet. Tiehallinnon selvityksiä 9/2001. Tiehallinto, Helsinki.

Tielaitos. (1993). Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen. Tielaitoksen selvityksiä 34/1993. Oulu.

Tielaitos. (1993). Yleiset perusteet, Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Tielaitos, Helsinki.

Ylitapio, S. (1998). TS-testin käyttö sitomattomien ja sidottujen murskeiden laadunvalvonnassa. Tielaitos, Rovaniemi.

Wan, A., Gray, M., Graham, J. (1995). On the relations of suction, moisture content, and soil structure in compacted clays. 1st. International Conference on Unsaturated Soils. Balkema, Rotterdam.